

Gabriele Kamin

Die Entwicklung der Ultraschalltechnik für die Diagnostik in der Geburtshilfe

1 Geschichte der Anwendung der Ultraschalltechnik

Nicht umsonst gaben die Griechen einer Nymphe den Namen Echo, sie wurde in einen Fels verwandelt, es blieb lediglich ihre Stimme – das Echo. Bereits ARISTOTELES kannte im 3. Jahrhundert v. Chr. das Phänomen des Schalls, der Steine nicht durchdrang und zurückgeworfen wurde.

Im 17. Jahrhundert war es der Philosoph und Universalwissenschaftler LAZZARRO SPALLANZANI, der im Rahmen seiner naturwissenschaftlichen Forschungen die Orientierung der Fledermäuse durch einen sogenannten sechsten Sinn beschrieb. In die gleiche Zeit können die ersten Messungen von Brunnentiefen mittels Schall datiert werden. Erst im Jahre 1938 wurde der von SPALLANZANI vermutete sechste Sinn der Fledermäuse von DONALD R. GRIFFIN als Ortung von Hindernissen und Beutetieren der Fledermäuse durch Ultraschall bewiesen.

Die Erzeugung von Schall durch den piezoelektrischen Effekt mit Schwingquarzen beschrieben 1880 erstmals die Brüder JACQUES und PIERRE CURIE [2]. Vor und während des Ersten Weltkrieges beschränkte sich die technische Anwendung des Ultraschalls auf die Echolotung von Hindernissen im Meer bzw. die Erkennung feindlicher U-Boote. Die Voraussetzung dafür schaffte ALEXANDER BEHM (1880 – 1952), der 1913, angeregt durch den Untergang der Titanic, das Echolot erfand [1]. Die nächsten Entwicklungen spielten sich wiederum im Bereich der Technik ab, sie galten hauptsächlich der Materialprüfung (S. SOKOLOV (1928), F. FIRESTONE (1942)).

Die Anwendung von Ultraschall in der Medizin hielt zuerst in den therapeutischen Bereichen Einzug. POHLMANN publizierte im Jahr 1939 die Therapie einer Epicondylitis (Gelenkentzündung) mit Ultraschall und 1947 wurde in Medizinerkreisen diskutiert, ob Ultraschall eine größere selektive Wirkung auf Karzinomzellen habe als Radiumstrahlen. Der erste diagnostische Einsatz des Ultraschalls geht auf den österreichischen Neurologen DUSSIK [5] zurück. Er hat in Zusammenarbeit mit seinem Bruder, einem Radiotechniker, ein Gerät zur Beurteilung der Hirnventrikel entwickelt. Sie nannten ihre Methode Hyperphonographie.

Nach dem Zweiten Weltkrieg wurde der in Zeiten des Krieges weiterentwickelten Technik von Ärzten und Technikern gemeinsam große Aufmerksamkeit geschenkt. Damit war der Grundstein der uns heute bekannten, aus dem klinischen Alltag nicht mehr wegzudenkenden Ultraschalldiagnostik gelegt.

Bevor diese allerdings Wertigkeit für die pränatale Diagnostik in der Geburtshilfe erlangen konnte, wurden zwischen 1948 und 1957 die A-Bild-Diagnostik zur Ortung von Gallensteinen (G. LUDWIG) und B-Mode-ähnliche Verfahren, das sog. Compound-Verfahren, mit einem Wasserbadscanner zur Diagnostik von Veränderungen an Leber, Niere, Blase und Brust erprobt. Das A-Bild-Verfahren ist das älteste sonografische Verfahren. Dabei werden die ausgesendeten Impulse nach dem Auftreffen und deren Ablenkung auf Grenzflächen dazu verwendet, einen Elektronenstrahl auf dem Betrachtungsmonitor auszu lenken. Das B-Bild-Verfahren ist im Gegensatz dazu ein

Der vorliegende Beitrag betrachtet die Entwicklung der Sonografie und erläutert die heutigen technischen Verfahren sowie deren Anwendung. Die Geschichte der Erkennung des physikalischen Phänomens Schall geht zwar bis in die Antike zurück, die Nutzung zur medizinischen Diagnostik begann jedoch erst in der Mitte des vorigen Jahrhunderts. Die Ultraschalldiagnostik ist ein heute aus dem klinischen Alltag nicht mehr wegzudenkendes nicht-invasives Verfahren zur Überwachung der normalen und gestörten Schwangerschaft. Bereits 1979 wurde das Verfahren in die Routinediagnostik im Rahmen der Schwangerschaftsbetreuung eingeführt. Die technische Entwicklung hat zu einer erheblichen Verbesserung in der Bildqualität und damit zur besseren Erkennbarkeit des Fetus, seiner Plazenta und Hüllen geführt.

The following contribution serves as an introduction to the history of ultrasonography and explains both the current technical methods and their application.

First knowledge of the phenomenon of sonic waves can be traced back to ancient times. Its utilisation in medical diagnosis, however, did not start until the middle of the last century. In daily medical routine, one cannot today imagine life without the non-invasive method of ultrasonic diagnostics for the monitoring of regular and abnormal pregnancies. The method was already introduced into routine pregnancy observation in 1979. Technical innovation has remarkably improved image processing, accompanied by unprecedented progress in visualisation of the foetus, its placenta and the amnion membranes.

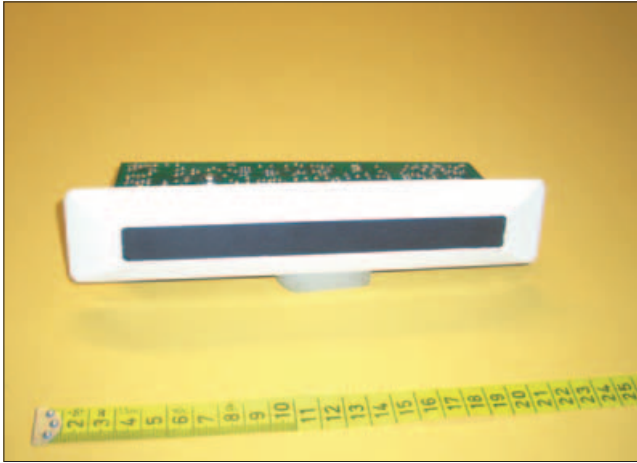


Bild 1a. Linearsonde des ersten an unserer Klinik verwendeten Gerätes (1978 – 1985)



Bild 1b. Moderne Sonden für die Anwendung in der Geburtshilfe

Schnittbildverfahren, bei dem die Zackendarstellung in ein zweidimensionales Hell-Dunkel-Bild mit Grauwerten umgesetzt wird. Als nichtinvasive, strahlenfreie bildgebende Methode wurde die Ultraschalltechnik für die Frauenheilkunde ein ideales Einsatzgebiet. So war es nur eine Frage der Zeit, dass dem Gynäkologen IAN DONALD und dem Ingenieur T. BROWN nach der Messung großer gynäkologischer Tumore im Jahre 1957 die erste Messung eines biparietalen Schädeldurchmessers, zuerst mit Hilfe der A-Bild-Technik, kurz darauf mittels Compound-Scanner, im Mutterleib gelang. Mit Hilfe der zweidimensionalen B-Mode-Methode war die anatomische Zuordnung der Strukturen nun wesentlich besser möglich. Die Umsetzung eines Echtzeitverfahrens gelang KRAUSE und SOLDNER im Jahre 1965. Heute sehen wir im B-Bild verschiedene Gewebestrukturen in anfänglich 16, heute in bis zu 256 differenzierten Graustufen. Diese wurden erstmals im Jahr 1972 von G. KOSOFF und W. GARRETT [6] den bis dahin wenigen Anwendern vorgestellt.

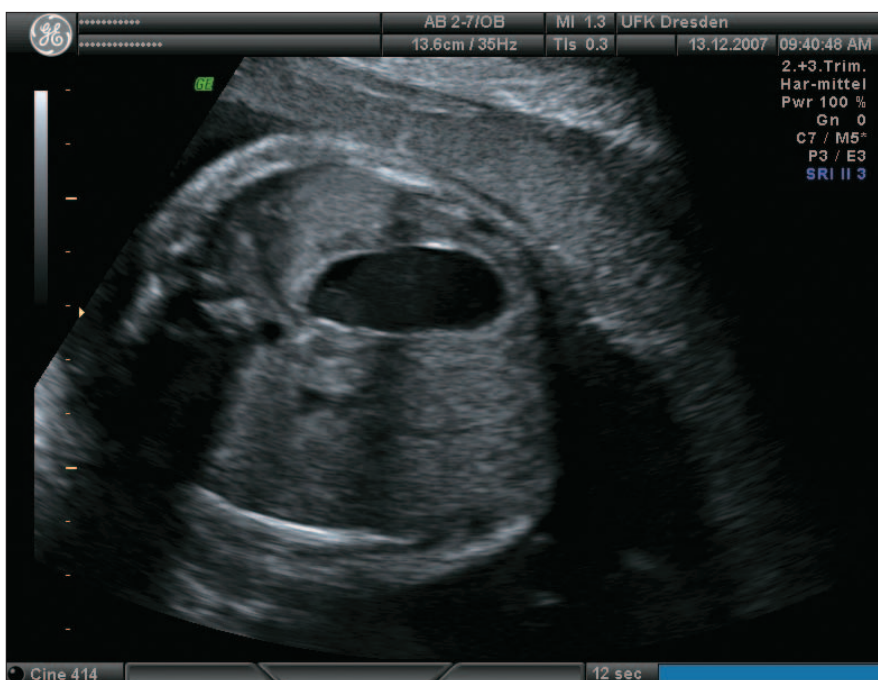
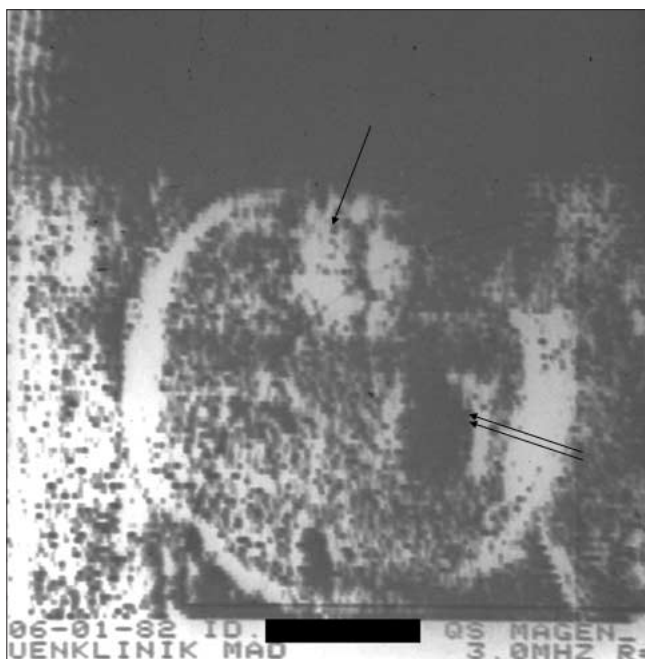
Die technischen Forschungen zur Verbesserung der Bildqualität begannen parallel in Japan, den USA und Europa. MANFRED VON ARDENNE stellte seit den späten 60er Jahren des letzten Jahrhunderts verschiedene A-Bild-Geräte her, die sowohl für Osteoporosediagnostik als auch für andere medizinische Diagnostik erprobt wurden. In der Klinik für Frauenheilkunde und Geburtshilfe war Mitte der 70er Jahre ein solches monströses A-Bild-Gerät installiert. Der Schallkopf befand sich an einem riesigen schwenkbaren Arm, das erzeugte Bild auf der Oszillografenröhre war dagegen winzig.

Die Grundlagen der heute angewandten Doppler-Sonografie beruhen auf den erstmals von CHRISTIAN JOHANN DOPPLER (österreichischer Mathematiker und Physiker 1803 – 1853) beschriebenen Phänomen der Änderung von Wellenfrequenzen bei Bewegung einer Lichtquelle in Abhängigkeit zum Betrachter, die er 1842 in einer Abhandlung „Über das farbige Licht der Doppelsterne“ veröffentlichte [4]. Mehr als einhundert Jahre später – 1959 –



Bild 2a. Profil eines 13 Wochen alten Fetus

wurde von SATOMURA dieser „Dopplereffekt“ zur Messung von Blutströmungsgeschwindigkeiten genutzt, damals natürlich noch in einer Schwarz-Weiß-Darstellung [8]. Die farblich codierte Dopplersonografie wurde erst durch die Anwendung moderner Rechentechnik ca. ab dem Jahr 1980 möglich. Danach verlief die Weiterentwicklung rasant, sodass die Ultraschalltechnik für fast alle Fachbereiche der Medizin ein wichtiges diagnostisches Hilfsmittel wurde, nicht allein auf Grund der verschiedenen Möglichkeiten der Sondengestaltung, sondern auch wegen der auf immer geringerem Raum unterzubringenden Technik. Die Geräte wurden transportabel und damit universeller einsetzbar. Heute sind transportable Ultraschallgeräte mit verschiedenen technischen Spezifikationen in Notebookgröße für den bettseitigen Einsatz vorhanden.



Bilder 2b – 2c. Vergleich der Bildqualität des fetal Thorax in der 30. Schwangerschaftswoche 1982 und heute (→ fetale Wirbelsäule, → fetaler Magen)

2 Technische Voraussetzungen und Verfahren

Die Ultraschalldiagnostik als Real-Time-Technik wird als diagnostisches Verfahren im Frequenzbereich zwischen 1 MHz und 40 MHz mit einer mittleren Schallintensität von 100mW/cm^2 angewandt. Im Rahmen der pränatalen Diagnostik ist dies auch die obere Grenze der Schallintensität, um negative Auswirkungen auf den Fetus sicher auszuschließen. Der gewählte Frequenzbereich ist den physikalischen Gesetzmäßigkeiten entsprechend von der gewünschten Eindringtiefe des Schalls abhängig. Ein nahe am Schallkopf befindliches Objekt wird mit hoher Frequenz in sehr guter Auflösung und ein tiefer liegendes Objekt mit geringerer Frequenz abgebildet.

Die physikalischen Schallphänomene wie Reflexion, Absorption, Streuung müssen bei den technischen Entwicklungen ebenso berücksichtigt werden wie die möglichst minimale Entstehung von Artefakten, z. B. Bewegungsartefakten und Auslöschphänomenen, welche die Bildqualität und damit die diagnostische Aussage mindern.

Der rasante Fortschritt in der Ultraschalltechnologie der letzten Jahre bietet den Frauenärzten verschiedene Verfahren für unterschiedliche Fragestellungen. Das sind die 2-D-Real-Time-Technik, die Doppler-/Farbdoppler-/Powerdopplertechnik, die M-Mode-Technik und letztendlich die 3-D/4-D-Sonografie.

2.1 Schallsonden

Moderne Schallsonden für die Anwendung in der Geburtshilfe sind Sonden für die abdominale Sonografie, die als Curved-Array oder Sektorschallköpfe mit Frequenzen zwischen 2 MHz und 5 MHz genutzt werden, sowie Sonden für die intracavitäre Sonografie (in der Frauenheilkunde und Geburtshilfe transvaginale Sonden) mit Frequenzen zwischen 7,5 MHz und 12 MHz und unterschiedlichem Abstrahlwinkel. Je größer der Abstrahlwinkel ist, desto kompletter kann das zu untersuchende Feld erfasst werden. Mit Hilfe der modernen Rechentechnik auf kleinstem Raum ist es möglich, während der Untersuchung ein Volumen aufzunehmen und daraus sofort, d. h. Real-Time,

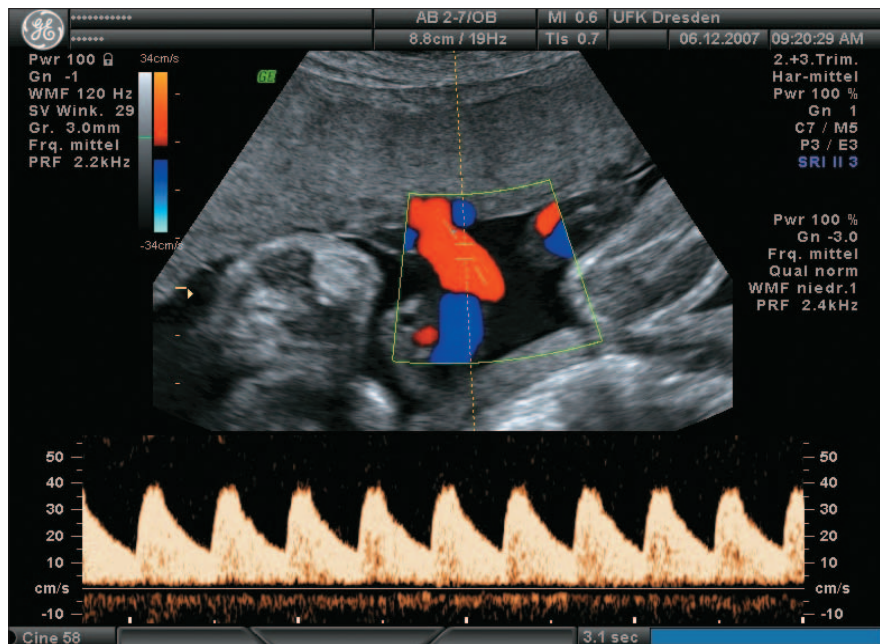


Bild 3a. Dopplersonografie einer Nabelschnurarterie – das obere Bild zeigt den Dopplerstrahl in der farbcodiert dargestellten Nabelschnurarterie, das untere Bild das dazugehörige normale Flussprofil dieser Nabelschnurarterie.

ein dreidimensionales Bild zu errechnen und darzustellen (sog. 4-D-Sonografie), s. Bilder 1a und 1b.

2.2 Darstellungsmethoden

2.2.1 2-D-Real-Time-B-Bild-Technik

Diese Technik ist die am häufigsten bei der Routineuntersuchung der Schwangeren angewandte Methode. Es wird ein zweidimensionales Echtzeitbild des untersuchten Areal erzeugt, welches die reflektierenden Gewebe in feinen Grauwertabstufungen darstellt. Erstellt wird dieses aus einzelnen Linien, wobei jede dieser Linien einem ausgesendeten und empfangenen Schallimpuls entspricht. Je nach Abstrahlwinkel können so bis zu einhundert Bilder pro Sekunde dargestellt werden. Nur durch diese Technik ist das normale harmonische Bewegungsmuster eines Fetus von

einem abnormen krankhaften Bewegungsablauf zu unterscheiden (Bilder 2a, 2b und 2c).

2.2.2 Doppler-Techniken

Die Doppler-Technik wurde in die pränatale Diagnostik nach der ersten Anwendung und Beschreibung durch FITZGERALD im Jahr 1977 eingeführt und erlangte in der Folgezeit bis heute eine herausragende Bedeutung bei der Überwachung von Hochrisikoschwangerschaften.

Die Frequenzverschiebung entsteht dadurch, dass die Schallwellen mit einer definierten Frequenz auf Blutkörperchen treffen, von diesen reflektiert und mit einer Frequenzverschiebung zum Empfänger zurückkehren. Mit Hilfe der Fourier-Transformation wird die Geschwindigkeit in Graustufen in Form einer Amplitude auf dem Monitor in

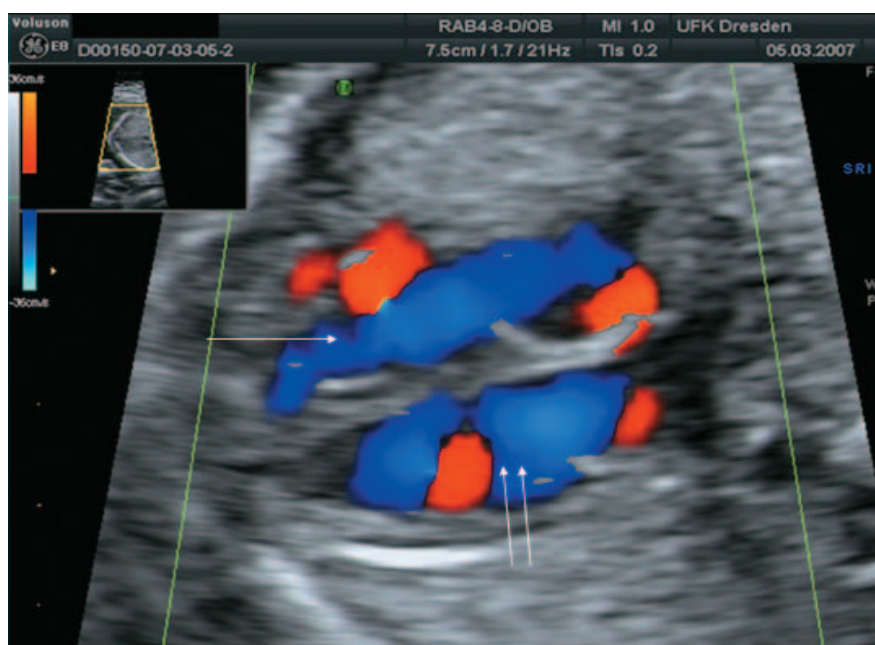


Bild 3b. Farbdoppler-Darstellung der fetalen Herzkammern in der 20. Schwangerschaftswoche (↗ linke Herzkammer, → rechte Herzkammer mit geöffneten Klappen während des Bluteinstroms)



Bild 4. 4-D-Darstellung eines fetalen Gesichts

einem Koordinatensystem mit Zeit und Geschwindigkeit als Achsen abgebildet. Auf Grund der Winkelabhängigkeit der Methode muss zur exakten Beurteilung der Flussgeschwindigkeit ein Einschallwinkel von $< 60^\circ$ eingehalten werden.

Pulsed-wave-Doppler

In der Geburtshilfe wird vorwiegend mit dem „Pulsed-Wave-Doppler“-Verfahren gearbeitet. Mit Hilfe eines definierten Messvolumens (sample volume) kann eine gezielte Selektion des zu untersuchenden Gefäßes erfolgen. Die Höhe der Geschwindigkeit kann in bestimmten Größen durch Veränderung der Pulsrepetitionsfrequenz eingestellt werden. Lediglich sehr hohe Geschwindigkeiten, wie sie bei einzelnen Herzklappenfehlern zu beobachten sind, können mit dieser Technik nicht exakt gemessen werden. Heute findet das Verfahren im Allgemeinen als Kombination von Spektral- und Farbdoppler mit der Real-Time-Sonografie (sog. Triplex-Mode) Anwendung.

Farbdoppler-Sonografie

Bei der farbcodierten Duplexsonografie wird für einen definierten Bereich (die Größe und Lage der Box sind frei einstellbar) die örtliche Dopplerfrequenz bestimmt und das Ergebnis in Farbe dem B-Bild überlagert. Dabei wird im Allgemeinen die Farbe Rot für die Bewegung auf den Schallkopf zu und die Farbe Blau für Bewegungen weg vom Schallkopf codiert. Mit dieser Technik lassen sich auch kleinste Blutgefäße schnell und sicher erkennen und untersuchen.

In den letzten Jahren finden zusätzlich neuere Methoden der Farbdarstellung, der sogenannte Angio- bzw. Power-Mode, Anwendung. Hierbei erfolgt die Auswertung der Amplitudenhöhe: Signale mit niedrigeren Intensitäten werden dunkler, höhere Intensitäten heller dargestellt. Die Gefäßdarstellung kann damit fast winkelunabhängig erfolgen, sodass insbesondere sehr kleine Gefäße mit langsamen Flüssen wie beispielsweise plazentare Gefäße sicher dargestellt werden können. Die Geräte der neuesten Generation

erlauben diese Darstellung bereits richtungscodiert (Bilder 3a und 3b).

2.2.3 3-D/4-D-Darstellung

Im Rahmen der zweidimensionalen Darstellung ist das Vorstellungsvermögen des Untersuchers für die Verarbeitung mehrerer hintereinander liegender Schnittebenen zu einem räumlichen Bild von entscheidender Bedeutung. Erfahrenen Untersuchern fällt dieses nicht schwer – die werdenden Eltern hingegen, deren Kind untersucht wird, können oft aus diesen Bildern wenig erkennen. Damit ist es gerade bei der Erläuterung schwieriger Befunde hilfreich, ein räumliches, im Idealfall reelles Bild darstellen zu können. Mit der 3-D-Sonografie lassen sich ganze Volumina speichern und ähnlich der Tomografie aufarbeiten. Die moderne Rechentechnik ermöglicht die 3-D-Volumina in Real-Time-Mode darzustellen (Bild 4).

3 Anwendung in der modernen pränatalen Diagnostik

In der Bundesrepublik Deutschland wurde bereits 1979, als erstem Land der Welt, ein Ultraschallscreening in die Mutterschaftsrichtlinien eingeführt (diese Richtlinien enthalten die für den behandelnden Frauenarzt im Rahmen der Schwangerenvorsorge zwingend erforderlichen diagnostischen Maßnahmen).

In der ehemaligen DDR gab es ab Mitte der 70er Jahre nur an wenigen Kliniken Ultraschallgeräte. Ein flächendeckendes Screening war somit nicht möglich. Frauen mit entsprechenden Risiken wurden zur Diagnostik in diese Kliniken überwiesen. Die Frauenklinik der ehemaligen Medizinischen Akademie „Carl Gustav Carus“ Dresden (jetzt Klinik und Poliklinik für Frauenheilkunde und Geburtshilfe des Universitätsklinikums Carl Gustav Carus an der TU Dresden) war seit 1978 im Besitz eines Ultraschall-B-Bild-Gerätes. Seit 1990 ist auch in den neuen Ländern der Bundesrepublik Deutschland in allen gynäkologischen Praxen die Ultraschalldiagnostik etabliert.

Mit der Neufassung der Mutterschaftsrichtlinien vom 1. April 1995 wurde eine dritte Ultraschalluntersuchung in die Mutterschaftsvorsorge eingeführt. Bis heute gilt, dass jede schwangere Frau Anspruch auf eine Sonografie in der 10. – 12., der 19. – 22. und 30. – 32. Schwangerschaftswoche zum Ausschluss fetaler Entwicklungsstörungen hat. Schwerpunkt der Diagnostik ist die Erkennung von Entwicklungsstörungen und Fehlbildungen zu einem möglichst frühen Zeitpunkt, um eine Risiko adaptierte Weiterbetreuung zu ermöglichen. Sollten aus der Vorgeschichte der Patientin oder im Verlauf der Schwangerschaft Risiken erkennbar sein, sind weiterführende Untersuchungen wie zum Beispiel die Dopplersonografie indiziert. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, auf eigene Kosten ein sog. Ersttrimesterscreening zur Risikoberechnung für das Vorliegen einer genetischen Störung kombiniert mit einer sehr frühen Organ-diagnostik oder auch ohne medizinische Indikation eine 3-D-Sonografie, bei Patientinnen und Ärzten „Babyfernsehen“ genannt, durchführen zu lassen.

In Deutschland besteht ein Dreistufenkonzept in der Ultraschalldiagnostik, das unterschiedliche Qualifikationsstufen der Untersucher berücksichtigt. Alle Frauen mit erkennbaren Risiken sollten nach der Basisdiagnostik die Möglichkeit haben, in einem qualifizierten Zentrum, z. B. einem Perinatalzentrum, untersucht zu werden.

Zukünftige Fortschritte der Rechentechnik und Verbesserungen der Qualität der Bilddarstellung werden uns mit jeder neuen Gerätegeneration bessere Einblicke in das intra-

uterine Leben bringen. Bereits heute ist es möglich, mit Hilfe verschiedener technischer Entwicklungen wie zum Beispiel der STIC-Technik (Spatio Temporal Image Correlation) einen kompletten Herzzyklus eines Fetus als Volumen aufzunehmen und die anatomische Integrität und die funktionellen Abläufe zu betrachten. Wir Anwender freuen uns für die uns anvertrauten Patientinnen über die immer besseren Möglichkeiten der Diagnostik.

Literatur

- [1] Behm, A.: Das Behm-Echolot. In: Ann Hydrogr **49** (1921), S. 241
- [2] Curie, I.; Curie, P.: Développement par pression de l'électricité polaire dans les cristaux hémihédres à faces inclinées. In: C R **91** (1880), S. 294
- [3] Donald, I.; Mac Vicar, J.; Brown, T. G.: Investigation of abdominal masses by pulsed ultrasound. In: Lancet I (1958), S. 1188
- [4] Doppler, C.: Über das farbige Licht der Doppelsterne und einiger anderer Gestirne des Himmels. In: Abhandlung der Böhmischen Gesellschaft der Wissenschaften. V. Folge. Bd. 2. 1842
- [5] Dussik, K. T.: Über die Möglichkeit, hochfrequente mechanische Schwingungen als diagnostisches Hilfsmittel zu verwenden. In: Z Gesamte Neurol Psychiatr **174** (1942), S. 153
- [6] Kosoff, G.; Robinson, D. E.; Garrett, W.: Two dimensional ultrasonography in obstetrics. In: Grossmann, C. (Hrsg.): Diagnostic ultrasound. New York: Plenum, 1966
- [7] Krause, W.; Soldner, R.: Ultraschallschnittbildverfahren (b-Scan) bei hoher Bildfrequenz für medizinische Diagnostik. In: Elektromedica **35** (1967), S. 4
- [8] Satomura, S.: Study of the flow patterns in peripheral arteries by ultrasound. In: J Acoust Soc Jpn (1959), S. 15

Manuskripteingang: 13.12.2007

Angenommen am: 28.1.2008



Kamin, Gabriele

Dr. med.

Studium Humanmedizin von 1970 bis 1975 an der Humboldt-Universität zu Berlin und Medizinischen Akademie „Carl Gustav Carus“ Dresden ♦ 1981 Promotion zur Dr. med. ♦ seit 1981 Fachärztin für Frauenheilkunde und Geburtshilfe/Subspezialisierung spezielle Geburtshilfe und Perinatologie ♦ Oberärztin an der Klinik und Poliklinik für Frauenheilkunde und Geburtshilfe, Universitätsklinikum Carl Gustav Carus der TU Dresden